

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151045

# 不同锌水平对低剂量镉在水稻中迁移能力的影响\*

曲荣辉<sup>1,2</sup> 张 燦<sup>2</sup> 李合莲<sup>1</sup> 马义兵<sup>1,2\*\*</sup>

(1. 济南大学资源与环境学院 济南 250022; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 北京 100081)

**摘要** 本研究利用水稻作为供试植物, 在轻度镉(Cd)污染[镉浓度分别为  $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (低剂量)、 $0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (中剂量)、 $0.09\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (高剂量)]水培条件下, 通过外源添加不同剂量锌(Zn, 浓度分别为  $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.025\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )研究水稻生物量变化及 Cd 在水稻体内分布和迁移, 探索 Zn、Cd 间的相互关系, 并筛选治理水稻 Cd 污染的最适外源 Zn 浓度。结果表明, 施加外源 Zn 水稻根茎叶的生物量均有所增加, 且 Zn 浓度为  $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  效果最显著。缺 Zn 条件( $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )下, 水稻根细胞质和细胞壁中的 Cd 含量比值随外源 Cd 浓度增加而降低; 加入外源 Zn 后, 细胞质与细胞壁中 Cd 含量比值有上升趋势,  $0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd 水平下变化显著。中低剂量( $0.01\sim0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )Cd 水平下, 施加 Zn 可降低水稻根部对 Cd 的吸收和转运。其中 Zn 浓度为  $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 水稻根、茎、叶中的 Cd 含量下降最为显著, 分别下降 38%、71%、65%(低剂量 Cd)和 44%、79%、69%(中剂量 Cd), 且水稻根与茎、根与叶的转移系数分别降低 53% 和 44%(低剂量 Cd)、62% 和 40%(中剂量 Cd); 而后随 Zn 浓度增加水稻各部位 Cd 含量及转移系数无显著变化。在高剂量 Cd 环境下, 施加外源 Zn 对水稻根、茎、叶 Cd 含量没有显著的抑制作用。因此, 在中低剂量的 Cd 污染条件下, Zn、Cd 间存在明显的拮抗作用, 且外源添加  $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn 是降低水稻 Cd 吸收迁移及增加水稻产量的最适浓度。

**关键词** 水稻 锌 镉 拮抗 锌迁移

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2016)04-0517-07

## Effects of zinc level on low dose cadmium transport in rice plant\*

QU Ronghui<sup>1,2</sup>, ZHANG Xi<sup>2</sup>, LI Helian<sup>1</sup>, MA Yibing<sup>1,2\*\*</sup>

(1. Environmental Science and Engineering, Jinan University, Jinan 250022, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract** The interaction of zinc (Zn) and cadmium (Cd) in soil is critical for the uptake and transport of Cd in rice plants. However, the effect of Zn levels on the interactions of Zn and Cd or on the rate of transport of Cd in rice plants is still not entirely clear. In this study, rice plant biomass, and Cd transport and distribution in rice plant were investigated in hydroponic experiment of mild Cd pollution with exogenous Zn addition. In the experiment, Cd concentrations were  $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (low dose),  $0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (medium dose),  $0.09\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (high dose), and  $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (control); and exogenous Zn were  $0.025\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . The aim of the study was to determine the mechanism of interactions between Zn and Cd and to identify the optimal Zn concentration that effectively reduced Cd pollution in rice. The results showed that biomasses of different parts of rice plant increased significantly with increasing concentration of Zn. The increase of biomass was highest in  $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  exogenous Zn treatment. However, there was no significant increase when Zn concentration exceeded  $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Due to the low dose of Cd in the experiment, there was no significant variation in rice plant biomass with increasing Cd concentration without exogenous Zn. Under Zn-free condition, the ratio of cytoplasm Cd to cell-wall Cd in rice root reduced from 2.88 to 1.04 with increasing Cd concentration. With the applying of exogenous Zn, the ratio of cytoplasm Cd to cell-wall

\* 国家科技部支撑计划项目(2015BAD05B01)和公益性环保行业专项(201509032)资助

\*\* 通讯作者: 马义兵, 主要从事土壤重金属环境风险评价和治理。E-mail: ybma@caas.ac.cn

曲荣辉, 主要从事土壤修复技术方面的研究。E-mail: rongh\_q@163.com

收稿日期: 2015-09-24 接受日期: 2015-12-11

\* The study was supported by the National Key Technologies R & D Program of China (No. 2015BAD05B01) and the Special Fund for Environment Protection Research in the Public Interest (No. 201509032).

\*\* Corresponding author, E-mail: ybma@caas.ac.cn

Received Sep. 24, 2015; accepted Dec. 11, 2015

chinaXiv:201711.00282v1

Cd showed increasing tendency, especially under  $0.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd. Under medium-to-low Cd dose ( $0.01\text{--}0.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), Zn significantly inhibited the uptake and transport of Cd in root, which significantly reduced Cd concentration in rice cytoplasm and cell wall. Compared with Zn-free treatment,  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn significantly reduced Cd content in rice. The concentration of Cd in plant root, stem and leaf reduced by 38%, 71% and 65% under low-dose Cd and by 44%, 79% and 69% under medium-dose Cd, respectively. The rate of transport of Cd between roots and stems, and between roots and leaves decreased by 53% and 44% under low-dose Cd, and by 62% and 40% under medium-dose Cd, respectively. When Zn concentration exceeded  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , there was no obvious change in the concentration of Cd in roots, stems and leaves along with the rate of Cd transport in rice. Under high concentration of Cd ( $0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), there was no obvious decline in Cd concentration in roots, stems and leaves due to addition of exogenous Zn. Addition of Zn promoted the absorption of Cd by rice stem and leaf. There was no obvious antagonism between Zn and Cd under high Cd concentration, although the synergies were obvious. Thus under medium-to-low dose Cd conditions, Zn controlled the phyto-availability of Cd due to obvious antagonistic effects between Zn and Cd. Application of  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn significantly reduced Cd phyto-availability and migration in rice and maximally increased plant biomass under low concentrations of Cd in hydroponic cultures.

**Keywords** Rice; Cadmium; Zinc; Antagonism; Cadmium transfer

目前镉(Cd)污染日益严重,利用锌(Zn)来缓解Cd对周围生物危害的研究报道也越来越多<sup>[1-4]</sup>,但Zn与Cd之间的作用机理仍存在争议。许多研究发现施Zn可以降低植物对Cd的吸收转运,以及减弱Cd对植物的毒害。Cherif等<sup>[5]</sup>研究表明低剂量的Zn会缓解Cd对西红柿(*Lycopersicon esculentum* Miller)的毒害,进而保护光化学功能。Yang等<sup>[6]</sup>发现喷施Zn肥可以使Cd污染土壤上的黄瓜(*Cucumis sativus* L.)茎中Cd的含量下降12%~36%。丁琼等<sup>[7]</sup>发现在施加钝化剂的基础上配施Zn肥可以进一步降低豆角(*Vigna unguiculata* L.)对Cd的吸收。但Tkalec等<sup>[8]</sup>研究发现在烟草(*Nicotiana tabacum* L.)根和种子中,Zn主要是促进Cd吸收。He等<sup>[9]</sup>的田间试验也表明施加Zn后,莴苣(*Lactuca sativa* L.)中Cd含量并没有减少,认为Zn、Cd间是一种协同作用。Zn、Cd间的复杂作用关系是导致结果不一致的主要原因,它跟植物的种类、作用部位、Zn和Cd浓度等因素有关。

目前Zn、Cd间作用机理已经有许多报道,主要集中在旱生植物,但是通过控制施加Zn的剂量研究对水稻Cd吸收转运及分布,并筛选最适的Zn施加量的报道较少<sup>[10]</sup>。本文针对我国农田污染的实际情况,以水稻为例,利用轻度Cd污染水培条件,通过施加不同剂量外源Zn,明确水稻体内Cd迁移及分布规律变化,揭示Zn、Cd间的相互关系,进一步探明Zn、Cd间的作用机理,筛选出促进水稻生长并且有效降低水稻Cd生物有效性的最适Zn浓度,为Cd污染农田合理施加Zn肥提供科学依据,实现污染治理和土壤可持续利用的目标。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试品种为‘湘早半山32号’水稻品种。供试Zn、

Cd主要化学试剂形态:  $3\text{CdSO}_4\cdot8\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{ZnSO}_4\cdot7\text{H}_2\text{O}$ 。水培营养液选用缺Zn的Hoagland and Arnon营养液,营养液组成为  $708 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot4\text{H}_2\text{O}$ 、 $1\,011 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{KNO}_3$ 、 $230 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 $493 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{MgSO}_4\cdot7\text{H}_2\text{O}$ 、 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{NaFe}\cdot\text{EDTA}$ 、 $2.86 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{H}_3\text{BO}_3$ 、 $2.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{MnSO}_4\cdot4\text{H}_2\text{O}$ 、 $0.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{CuSO}_4\cdot5\text{H}_2\text{O}$ 、 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot4\text{H}_2\text{O}$ 。为稳定营养液pH值,选择2-(N-吗啡啉)乙磺酸(MES)做缓冲剂,利用 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  HCl及 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaOH调节pH至5。

### 1.2 试验设计

试验Cd浓度设置分别为 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,本文中分别将 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Cd溶液定义为低、中、高剂量Cd溶液。锌溶液浓度分别为 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.025 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。共20个处理,每个处理重复4次。

水稻种子用 $10\%$   $\text{H}_2\text{O}_2$ 消毒20 min,用蒸馏水充分清洗后浸种催芽,然后选取露白的种子播种于育苗盘中,用 $1/4$ 浓度营养液培养,并将其放置于人工气候箱中培养<sup>[11]</sup>。培养条件:白天光照14 h,温度为 $(24\pm2)$  °C,光照强度为25 000 lux;夜间黑暗10 h,温度为 $(18\pm2)$  °C,相对湿度75%<sup>[12]</sup>。待种子长到3片叶子时,选取大小均匀的幼苗移栽到800 mL水稻培养瓶中,每瓶均匀分布4颗水稻幼苗,并利用 $1/2$ 营养液培养5 d后加入Zn、Cd混合溶液。每3 d更换一次营养液,培养21 d后收获。

收获时,用大量去离子水冲洗根部,并擦干称重<sup>[13]</sup>,从每个培养瓶4株水稻根部中取混合样品200 mg采用预冷的匀浆液研磨使其匀浆化。匀浆液组成:蔗糖 $250 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,三(羟甲基)氨基甲烷(Tris HCl)(pH 7.5) $50 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_2\text{S}_2$  $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

将组织匀浆在  $20\,000\times g$  下离心 45 min, 底层碎片为细胞壁组分, 上层为细胞质组分<sup>[14]</sup>。取上层细胞质溶液放置低温下待测(试验在 4 ℃下进行操作)。

将剩余根、茎、叶放入烘箱杀青、烘干, 烘干后称各组分质量后, 将它们与蒸干后细胞壁组分转移到消解罐中, 加入  $HNO_3$  和  $H_2O_2$  (3 : 1, V/V), 然后放入微波消解仪(MLS1200)中进行微波消解, 消解完全后将样品移入比色管中定容, 转移到干净的瓶子中, 待测。处理后的样品利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定 Zn 和 Cd 含量。

### 1.3 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 软件进行统计处理, 利用 SPSS 18.0 软件进行处理间差异显著性分析, 利用 Excel 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同锌镉处理下水稻生物量的变化

Cd 是植物生长发育的非必需元素, 当环境中 Cd 剂量超过植物所能承受的阈值时, 植物的生长发育就会受到影响。如表 1 所示, 在相同 Zn 浓度培养下的水稻, 随外源 Cd 剂量的增加, 生物量无显著变化( $P>0.05$ ), 表明外源施加 Cd 剂量较低, 在水稻可承受耐性范围内, 并不足以显著影响水稻的生长。另外, 在相同 Cd 浓度下, 随 Zn 浓度的增加, 水稻根茎叶的生物量整体呈上升趋势, 表明 Zn 可以促进水稻的生长。Zn 浓度为  $0.05\,mg\cdot L^{-1}$  时, 水稻根茎叶生物量均有显著增加( $P<0.05$ )。随 Zn 浓度继续增加, 水稻生物量增加趋势无显著变化( $P>0.05$ ), 表明在本试验条件下促进水稻生长的最佳 Zn 浓度为  $0.05\,mg\cdot L^{-1}$ 。

表 1 锌镉复合作用下对水稻生物量的变化

Table 1 Biomass of the roots, stems and leaves of the rice under different Zn-Cd treatments  $g\cdot plant^{-1}$

锌处理 Zn treatment	根部生物量 Root biomass				茎部生物量 Stem biomass			叶生物量 Leaf biomass				
	Cd0	Cd0.01	Cd0.03	Cd0.09	Cd0	Cd0.01	Cd0.03	Cd0.09	Cd0	Cd0.01	Cd0.03	Cd0.09
Zn0	$0.09\pm 0.00b$	$0.10\pm 0.00c$	$0.09\pm 0.00b$	$0.09\pm 0.00c$	$0.05\pm 0.00c$	$0.04\pm 0.01c$	$0.04\pm 0.00b$	$0.03\pm 0.01c$	$0.11\pm 0.00c$	$0.10\pm 0.00d$	$0.09\pm 0.01c$	$0.08\pm 0.01c$
Zn0.025	$0.08\pm 0.00b$	$0.11\pm 0.00c$	$0.10\pm 0.01b$	$0.09\pm 0.01c$	$0.04\pm 0.00c$	$0.08\pm 0.00c$	$0.04\pm 0.01b$	$0.03\pm 0.02c$	$0.07\pm 0.01d$	$0.11\pm 0.00d$	$0.08\pm 0.01c$	$0.07\pm 0.01c$
Zn0.05	$0.17\pm 0.00a$	$0.16\pm 0.00b$	$0.17\pm 0.00a$	$0.16\pm 0.01a$	$0.12\pm 0.00b$	$0.08\pm 0.00b$	$0.13\pm 0.00a$	$0.07\pm 0.01b$	$0.21\pm 0.00b$	$0.18\pm 0.00c$	$0.24\pm 0.01a$	$0.13\pm 0.00b$
Zn0.1	$0.17\pm 0.00a$	$0.19\pm 0.00a$	$0.16\pm 0.00a$	$0.17\pm 0.00a$	$0.14\pm 0.00a$	$0.14\pm 0.00a$	$0.11\pm 0.00a$	$0.08\pm 0.00a$	$0.26\pm 0.00a$	$0.21\pm 0.01b$	$0.23\pm 0.00a$	$0.15\pm 0.01a$
Zn0.2	$0.17\pm 0.00a$	$0.18\pm 0.00ab$	$0.16\pm 0.00a$	$0.15\pm 0.01b$	$0.11\pm 0.00ab$	$0.15\pm 0.01a$	$0.13\pm 0.01a$	$0.07\pm 0.00b$	$0.21\pm 0.00a$	$0.26\pm 0.00a$	$0.18\pm 0.00b$	$0.18\pm 0.00a$

Zn0、Zn0.025、Zn0.05、Zn0.1、Zn0.2 分别代表 Zn 的添加量为  $0\,mg\cdot L^{-1}$ 、 $0.025\,mg\cdot L^{-1}$ 、 $0.05\,mg\cdot L^{-1}$ 、 $0.1\,mg\cdot L^{-1}$  和  $0.2\,mg\cdot L^{-1}$ , Cd0、Cd0.01、Cd0.03、Cd0.09 分别代表 Cd 的添加量分别为  $0\,mg\cdot L^{-1}$ 、 $0.01\,mg\cdot L^{-1}$ 、 $0.03\,mg\cdot L^{-1}$  和  $0.09\,mg\cdot L^{-1}$ 。同列不同字母表示相同组织不同处理差异显著( $P<0.05$ )。表中数值为平均值±标准差。下同。Zn0、Zn0.025、Zn0.05、Zn0.1 和 Zn0.2 indicated  $0\,mg\cdot L^{-1}$ ,  $0.025\,mg\cdot L^{-1}$ ,  $0.05\,mg\cdot L^{-1}$ ,  $0.1\,mg\cdot L^{-1}$  and  $0.2\,mg\cdot L^{-1}$  Zn exposure, respectively. Cd0, Cd0.01, Cd0.03 and Cd0.09 indicated  $0\,mg\cdot L^{-1}$ ,  $0.01\,mg\cdot L^{-1}$ ,  $0.03\,mg\cdot L^{-1}$  and  $0.09\,mg\cdot L^{-1}$  Cd exposure, respectively. Different letters in the same column indicated significant difference at 5% level ( $P < 0.05$ ). The results were expressed as mean ± SD. The same below.

### 2.2 不同锌镉处理下镉在水稻根系亚细胞中的分布

溶液中 Cd 通过水稻根部的吸收, 扩散到根部细胞质(Cyt)与细胞壁(CW)中。由图 1 可以看出, 在缺 Zn 条件下, 随 Cd 浓度的增加, Cyt 与 CW 中 Cd 含量的比值逐渐降低, 并且当 Cd 浓度为  $0.03\,mg\cdot L^{-1}$ 、 $0.09\,mg\cdot L^{-1}$  时达到显著水平( $P<0.05$ )。在低浓度 Cd 环境下, Cyt 中 Cd 含量高于 CW 中 Cd 含量, 表明在低剂量 Cd 胁迫下, Cd 优先贮存在 Cyt 中, 少量存在于 CW 中<sup>[15]</sup>。随着 Cd 剂量逐渐升高, Cyt 中 Cd 所占的组分由 72% 下降到 51%, 与 CW 中 Cd 含量比值接近于 1, 表明在高剂量 Cd 污染下, CW 对 Cd 的固定能力增加, 导致 Cyt 与 CW 中 Cd 含量的差值逐渐减小。随着添加锌浓度的增加, Cyt 与 CW 中 Cd 含量的比值在  $0.03\,mg\cdot L^{-1}$  和  $0.09\,mg\cdot L^{-1}$  Cd 浓度下呈增加趋势, 且在  $0.03\,mg\cdot L^{-1}$  Cd 浓度下变化显著, 表明施 Zn 有可能促进 Cd 向 Cyt 中转移的作用。

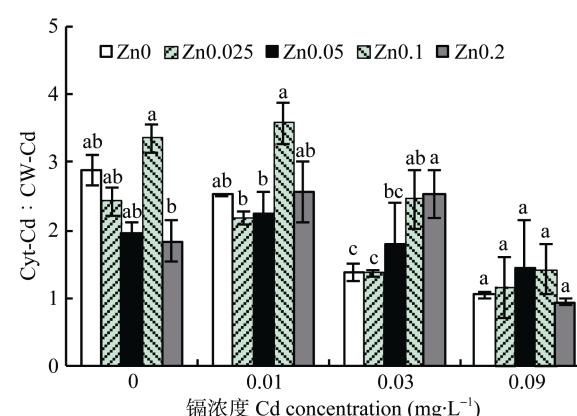


图 1 不同浓度 Zn、Cd 处理下水稻根部细胞质(Cyt)与细胞壁(CW)中 Cd 含量比值(Cyt-Cd : CW-Cd)的变化

Fig. 1 Ratios (Cyt-Cd : CW-Cd) of Cd between cytoplasm (Cyt) and cell wall (CW) in the rice roots affected by concentrations of Cd and Zn in culture solution

不同小写字母表示同一 Cd 处理下不同 Zn 处理间达到显著性差异。下同。Different letters denoted significant difference under the same Cd concentrations among different Zn treatments at  $P < 0.05$ . The same below.

从图 2 中可以发现, 在中低剂量的 Cd 浓度下, 通过利用未施 Zn 与施加不同剂量 Zn 条件下水稻根中 Cyt 和 CW 中 Cd 含量变化对比, 发现施加 Zn 可以显著抑制水稻根部 Cyt 与 CW 对 Cd 的吸收 ( $P<0.05$ )。随着 Zn 含量的增加 Cyt 与 CW 中 Cd 含量会有所下降。当 Zn 浓度为  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 抑制效果均达到显著水平( $P<0.05$ )。低剂量 Cd 在 Zn 浓度

为  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, Cyt 对 Cd 吸收量下降了 82%, CW 下降了 77%, 中剂量 Cd 中, Cyt 与 CW 的对 Cd 的吸收量分别下降了 80% 和 84%, 在高 Cd 浓度( $0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )下, Zn 浓度达到  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, Cyt 对 Cd 的吸收量降低 12%, CW 中降低了 35%。说明 Zn 在中低剂量 Cd 浓度下, 对降低 Cd 的植物有效性有显著作用, 高剂量 Cd 浓度下, 施加 Zn 对控制 Cd 污染无显著作用。

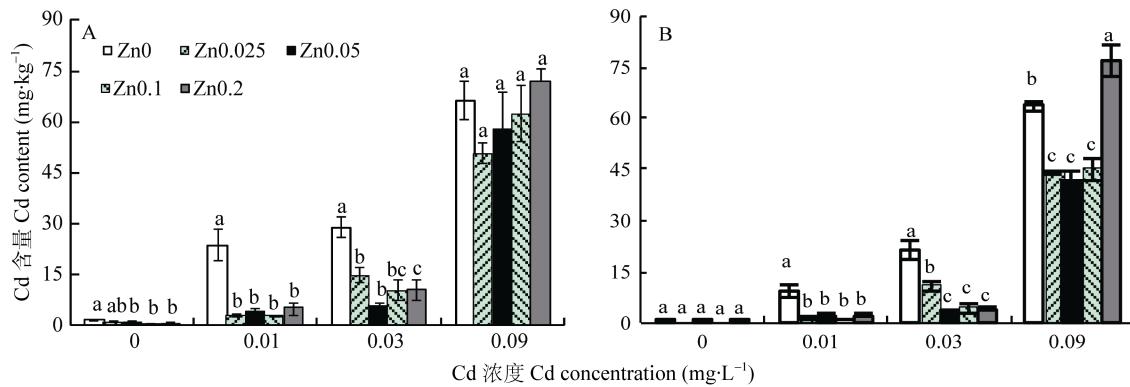


图 2 不同浓度 Zn、Cd 处理对 Cd 在水稻根部细胞质(A)和细胞壁(B)中分布的影响  
Fig. 2 Contents of Cd in cytoplasm (A) and cell wall (B) of rice roots under different Zn and Cd treatments

### 2.3 不同锌镉处理对水稻体内镉分布的影响

由图 3 可知, Cd 主要分布在水稻根部, 其次是茎, 少量分布在叶中。当 Zn 浓度为  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 低 Cd 胁迫下, 水稻根茎叶中 Cd 的积累量均显著下降( $P<0.05$ )。同样 Zn 浓度为  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 在中剂量 Cd 浓度下, 除根部 Cd 含量与未施加 Zn 条件下相比变化没有达到显著水平, 茎与叶中均达到显著水平( $P<0.05$ )。在低剂量和中剂量 Cd 浓度下, 受  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  外源 Zn 的影响, 水稻根中, Cd 的积累量分别下降了 38% 和 44%, 水稻茎中 Cd 的积累量分别下降了 71% 和 79%, 水稻叶子中 Cd 的积累量分别下降了 65% 和 69%。同时发现, 在中低剂量 Cd 污染下, 随着 Zn 浓度的继续增加,  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  与  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn 对根茎叶中 Cd 累积量的影响没有显著差别( $P>0.05$ ), 表明在中低 Cd 污染条件下, 施加 Zn 可以显著降低水稻对 Cd 的吸收转运, 从而降低植物对 Cd 的富集。同时当 Zn 浓度超过  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  后, 对降低中低剂量 Cd 的植物有效性作用效果并不明显, 说明  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn 是本试验中降低水稻 Cd 吸收的最适浓度。在外源 Cd 浓度为  $0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 根茎中 Cd 含量受施 Zn 的影响并不显著( $P>0.05$ ), 叶中当 Zn 浓度大于  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时变化显著, 与缺 Zn 组相比呈显著上升趋势。

### 2.4 不同锌镉处理水稻体内镉转移系数的变化

植物的转移系数(TF)(transfer factor)是指植物的

地上茎叶与根部重金属含量的比值, 是衡量植物体对重金属从根部到地上部的有效转移程度。图 4 中, 中低浓度 Cd 从根向茎的转移系数随 Zn 施加量的增加显著下降( $P<0.05$ ), 在高 Cd 情况下施 Zn, 并不能显著降低 Cd 从根向茎的转移( $P>0.05$ ), 反而会有上升趋势, 说明在中低 Cd 情况下施 Zn 会降低 Cd 从根向茎迁移的能力, 高 Cd 情况下施 Zn 并不能降低 Cd 向茎的迁移, 反而会促进 Cd 的迁移。中低浓度 Cd 在根与叶之间的转移系数亦随 Zn 浓度增加而降低, 而高浓度 Cd 在根与叶之间的转移系数随 Zn 的施加有上升趋势。

从图 4 中可以看出, 在未施加 Zn 情况下, 在低、中、高 3 种剂量 Cd 中, 依次  $\text{TF}_{\text{低}}>\text{TF}_{\text{中}}>\text{TF}_{\text{高}}$ , 表明 Cd 浓度越低越容易被植物吸收。同时, 随 Zn 施加量的增加, 中低剂量 Cd 的转移系数明显下降, 并且在 Zn 浓度为  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时达显著水平( $P<0.05$ ), 之后无显著变化, 低、中剂量 Cd 处理根-茎的 TF 分别降低 53% 和 62%, 根-叶的 TF 分别降低了 44% 和 40%, 表明在中低剂量 Cd 污染下  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Zn 是降低 Cd 在植物体内迁移的最适浓度。高剂量 Cd 条件下, Cd 的转移系数随 Zn 浓度的增加而呈上升趋势, 表明在高剂量 Cd 条件下 Zn、Cd 间无显著作用( $P>0.05$ )。

### 3 讨论

Zn 是植物生长发育必需的微量元素。本试验中,

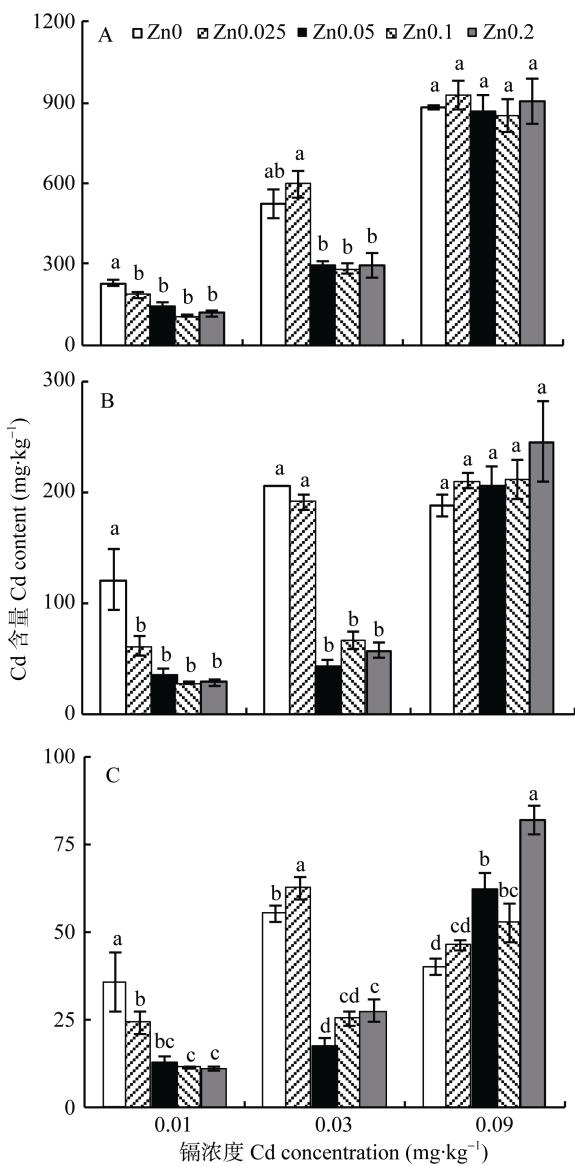


图3 不同浓度 Zn、Cd 处理对水稻根(A)、茎(B)、叶(C)中 Cd 含量的影响

Fig. 3 Changes of Cd contents in roots (A), stems (B) and leaves (C) of rice under different Zn and Cd treatments

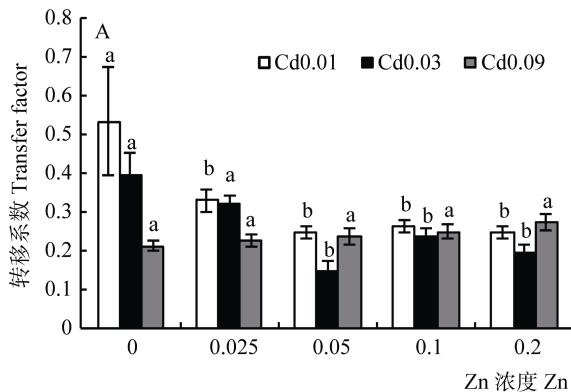


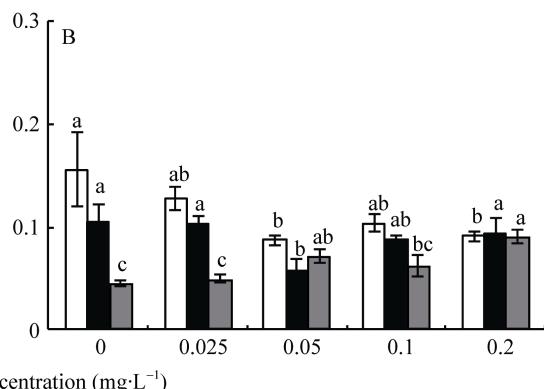
图4 不同浓度 Zn/Cd 处理对 Cd 在水稻根-茎(A)与根-叶(B)间转移系数的影响

Fig. 4 Zn on Cd transfer factors from roots to stems (A) and from roots to leaves (B) of rice under different Zn and Cd treatments

随施加外源 Zn 含量的增加, 水稻根茎叶的生物量均增加, 可能是由于 Zn 对植物的光合作用有促进作用<sup>[16]</sup>。Zn 浓度超过  $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  后, 水稻生物量无显著变化, 可能由于 Zn 浓度对水稻生长的促进作用达到饱和, 同时也表明  $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Zn 是本试验中水稻最适生长浓度。在同一 Zn 浓度不同 Cd 浓度处理下, 水稻的生物量变化并不显著, 由于本试验中设置外源 Cd 的施加量( $<0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )浓度属中低剂量, 对水稻的生长并没有产生显著影响。

缺 Zn 情况下, Cd 更多地分布在 Cyt 中, 另外 Ma 等<sup>[17]</sup>也发现有超过 90% 的 Cd 储存在原生质体中, 这种现象主要与植物细胞中液泡的区隔化解毒机制有关。一旦 Cd 进入植物细胞, 细胞会通过亚细胞将金属 Cd 固定在液泡中进行有效内部解毒<sup>[18]</sup>, 从而减少 Cd 对细胞内部组织的破坏<sup>[19]</sup>。随着 Cd 浓度的增加, Cyt 与 CW 中 Cd 的比值在不断缩小, 可能是高浓度 Cd 刺激水稻根部 CW, 促进 CW 分泌带负电的亲 Cd 物质, 将 Cd 离子吸附, 从而增强水稻根部 CW 对 Cd 的固定能力<sup>[20]</sup>, 阻止 Cd 进入细胞。随外源 Zn 的添加, Cyt 与 CW 中 Cd 的比值有上升趋势, 可能由于 Zn 与 Cd 竞争 CW 表面的吸附位点, 导致 Cyt 中 Cd 含量增加。

根是植物抵制重金属毒害的第一道屏障。Cd<sup>2+</sup>通过共质体和质外体途径进入木质部导管向上运输, 大部分 Cd<sup>2+</sup>会在皮层细胞间沉淀<sup>[21]</sup>, 因而大部分 Cd 被阻隔在根中, 其次是茎, 最后是叶<sup>[22-25]</sup>。随着外源 Zn 浓度的增加, 可以显著降低中低剂量水稻根的 Cyt 与 CW 中 Cd 积累。Hart 等<sup>[26]</sup>认为 Zn 与 Cd 在吸收和运输过程中共用同一个转运子, 而 Zn 是 Cd 在该转运子结合位点的主要竞争者, 导致根部对 Cd 的吸附减少。华珞等<sup>[27]</sup>认为 Zn 与 Cd 之间存在相同



的运输通道, 但Zn吸收是主动运输, 而Cd吸收更多的是被动运输, 所以Zn会占一定优势, 因此Cd吸收量下降可能是由于Zn对根细胞膜吸附位点和根部运输通道竞争导致的, 与Mckenna等<sup>[2]</sup>的结论一致。同时中低剂量的Cd在水稻茎、叶中累积量也随Zn施加量的增加而明显降低, 可能由于Zn-Cd竞争与蛋白质结合导致更多的Cd处于游离状态, 而在木质部运输过程中CW对自由离子有很强的交换能力, 从而导致Cd的运输速率下降<sup>[28]</sup>。在中低剂量Cd污染条件下, 研究结果与其他一些研究报道结果一致, 施加外源Zn可以明显抑制植物根系对Cd的吸收<sup>[29]</sup>以及Cd在植物体内的运输和转运<sup>[30-31]</sup>, 而在高Cd条件下, 随Zn施加量的增加, 根、茎中Cd含量无明显变化, 而在叶中Cd含量反而有所上升, 表明在高Cd条件下, 施Zn并不能显著降低植物对Cd的吸收及迁移, 可能是由于Cd与Zn有相同的价态和近似相同的离子半径, 在植物细胞表面竞争结合位点, 导致Cd的溶解性增强, 促使Cd从根部向顶部转移<sup>[27]</sup>, 因此在不同Cd污染程度下, 通过施加Zn肥对控制Cd污染的效果不同。

## 4 结论

本研究表明, 施加 Zn 可以增加水稻的生物量,  $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Zn 时达到显著水平。同时在中低剂量 Cd 污染条件下, 施加  $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  Zn 可以显著降低 Cd 的植物有效性, 并且减弱 Cd 在植物体内的转运, 对降低高剂量 Cd 的有效性效果并不明显。在中低剂量 Cd 污染条件下, Zn、Cd 间属于拮抗作用, 在高剂量 Cd 污染下, Zn、Cd 间拮抗作用并不明显, 可能伴有协同作用。因此对于中低剂量 Cd 污染, 通过施加 Zn 肥维持土壤有效态 Zn 浓度为  $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  可以较大幅度地提高水稻产量, 减少水稻对 Cd 吸收和转运。但对高剂量 Cd 污染环境下, 施加 Zn 肥对降低 Cd 的植物有效性影响并不显著。

## 参考文献 References

- [1] Li B, Yang J X, Wei D P, et al. Field evidence of cadmium phytoavailability decreased effectively by rape straw and/or red mud with zinc sulphate in a Cd-contaminated calcareous soil[J]. PLoS One, 2014, 10(9): e109967
- [2] McKenna I M, Chaney R L, Williams F M. The effects of cadmium and zinc interactions on the accumulation and tissue distribution of zinc and cadmium in lettuce and spinach[J]. Environmental Pollution, 1993, 79(2): 113–120
- [3] Kirkham M B. Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments[J]. Geoderma, 2006, 137(1/2): 19–32
- [4] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 磷肥对土壤中镉的植物有效性影响及其机理[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1585–1590  
Liu Z B, Ji X H, Peng H, et al. Effects of phosphorous fertilizers on phytoavailability of cadmium in its contaminated soil and related mechanisms[J]. Journal of Applied Ecology, 2012, 23(6): 1585–1590
- [5] Cherif J, Derbel N, Nakach M, et al. Spectroscopic studies of photosynthetic responses of tomato plants to the interaction of zinc and cadmium toxicity[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2012, 111: 9–16
- [6] Yang J X, Wang L Q, Wei D P, et al. Foliar spraying and seed soaking of zinc fertilizers decreased cadmium accumulation in cucumbers grown in Cd-contaminated soils[J]. Soil and Sediment Contamination, 2011, 20(4): 400–410
- [7] 丁琼, 杨俊兴, 华珞, 等. 不同钝化剂配施硫酸锌对石灰性土壤中镉生物有效性的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 312–317  
Ding Q, Yang J X, Hua L, et al. Cadmium phytoavailability to cowpea decreased by rape straw and red mud with zinc sulphate in a calcareous soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(2): 312–317
- [8] Tkalec M, Štefanić P P, Cvjetko P, et al. The effects of cadmium-zinc interactions on biochemical responses in tobacco seedlings and adult plants[J]. PLoS One, 2014, 9(1): e87582
- [9] He P P, Lü X Z, Wang G Y. Effects of Se and Zn supplementation on the antagonism against Pb and Cd in vegetables[J]. Environment International, 2004, 30(2): 167–172
- [10] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, et al. Zinc effects on cadmium accumulation and partitioning in near-isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium concentration[J]. New Phytologist, 2005, 167(2): 391–401
- [11] 宋阿琳, 娄运生, 梁永超. 不同水稻品种对铜镉的吸收与耐性研究[J]. 中国农学通报, 2009, 22(9): 408–411  
Song A L, Lou Y S, Liang Y C. Research on copper and cadmium uptake and tolerance in different rice varieties[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 22(9): 408–411
- [12] 孙聪, 陈世宝, 马义兵, 等. 基于物种敏感性分布(Burr-)模型预测Cd对水稻毒害的生态风险阈值 HC<sub>5</sub>[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2316–2322  
Sun C, Chen S B, Ma Y B, et al. Ecological hazard concentration (HC<sub>5</sub>) of cadmium (Cd) to rice cultivars under hydroponic culture as determined with species sensitivity distribution model (Burr- )[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(12): 2316–2322
- [13] Weigel H J, Jäger H J. Subcellular distribution and chemical form of cadmium in bean plants[J]. Plant Physiology, 1980, 65(3): 480–482
- [14] Chakravarty B, Srivastava S. Effect of cadmium and zinc interaction on metal uptake and regeneration of tolerant plants in linseed[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1997, 61(1): 45–50
- [15] 万敏, 周卫, 林葆. 镉积累不同类型的小麦细胞镉的亚细胞和分子分布[J]. 中国农业科学, 2003, 36(6): 671–675

- Wan M, Zhou W, Lin B. Subcellular and molecular distribution of cadmium in two wheat genotypes differing in shoot/root Cd partitioning[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(6): 671–675
- [16] 陈贵青, 张晓璟, 徐卫红, 等. 不同 Zn 水平下辣椒体内 Cd 的积累、化学形态及生理特性[J]. *环境科学*, 2010, 31(7): 1657–1662
- Chen G Q, Zhang X J, Xu W H, et al. Effect of different zinc levels on accumulation and chemical forms of cadmium, and physiological characterization in *Capsicum annuum* L.[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(7): 1657–1662
- [17] Ma J F, Ueno D, Zhao F J, et al. Subcellular localisation of Cd and Zn in the leaves of a Cd-hyperaccumulating ecotype of *Thlaspi caerulescens*[J]. *Planta*, 2005, 220(5): 731–736
- [18] Vögeli-Lange R, Wagner G J. Subcellular localization of cadmium and cadmium-binding peptides in tobacco leaves[J]. *Plant Physiology*, 1990, 92(4): 1086–1093
- [19] Chardonnens A N, Bookum W M, Kuijper L D J, et al. Distribution of cadmium in leaves of cadmium tolerant and sensitive ecotypes of *Silene vulgaris*[J]. *Physiologia Plantarum*, 1998, 104(1): 75–80
- [20] 陈爱菱, 王茂意, 刘晓海, 等. 水稻对重金属镉的吸收及耐性机理研究进展[J]. *生态科学*, 2013, 32(4): 514–522
- Chen A K, Wang M Y, Liu X H, et al. Research progress on the effect of cadmium on rice and its absorption and tolerance mechanisms[J]. *Ecological Science*, 2013, 32(4): 514–522
- [21] 王晓娟, 王斌, 杨龙, 等. 重金属镉(Cd)在植物体内的转运途径及其调控机制[J]. *生态学报*, 2015, 35(23): 7921–7929
- Wang X J, Wang W B, Yang L, et al. Transport pathways of cadmium (Cd) and its regulatory mechanisms in plant[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(23): 7921–7929
- [22] Wang X, Liu Y G, Zeng G M, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Bechmeria nivea* (L.) Gaud[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 62(3): 389–395
- [23] Wu Q T, Xu Z L, Ye H, et al. Chemical composition of root and stem saps in relation to cadmium resistance and accumulation in *Brassica parachinensis*[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(3): 352–359
- [24] Akhter M F, McGarvey B, Macfie S M. Reduced translocation of cadmium from roots is associated with increased production of phytochelatins and their precursors[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2012, 169(18): 1821–1829
- [25] 肖美秀, 林文雄, 陈祥旭, 等. 镉在水稻体内的分配规律与水稻镉耐性的关系[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(2): 379–381
- Xiao M X, Lin W X, Chen X X, et al. The relation between the law of Cd distribution in rice and the Cd-tolerance[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(2): 379–381
- [26] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, et al. Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread wheat and durum wheat seedlings[J]. *Physiologia Plantarum*, 2002, 116(1): 73–78
- [27] 华珞, 白铃玉, 韦东普, 等. 镉锌复合污染对小麦籽粒镉累积的影响和有机肥调控作用[J]. *农业环境保护*, 2002, 21(5): 393–398
- Hua L, Bai L Y, Wei D P, et al. Combination of pollutants cadmium and zinc and its effects on Cd accumulation in wheat grain and adjustment by organic manure[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21(5): 393–398
- [28] 张玉秀, 于飞, 张媛雅, 等. 植物对重金属镉的吸收转运和累积机制[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(5): 1317–1321
- Zhang Y X, Yu F, Zhang Y Y, et al. Uptake, translocation and accumulation of cadmium in plant[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(5): 1317–1321
- [29] Köleli N, Eker S, Cakmak I. Effect of zinc fertilization on cadmium toxicity in durum and bread wheat grown in zinc-deficient soil[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 131(3): 453–459
- [30] Salah S A, Barrington S F. Effect of soil fertility and transpiration rate on young wheat plants (*Triticum aestivum*) Cd/Zn uptake and yield[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 82(1/2): 177–192
- [31] Cakmak I, Welch R M, Erenoglu B, et al. Influence of varied zinc supply on re-translocation of cadmium (109Cd) and rubidium (86Rb) applied on mature leaf of durum wheat seedlings[J]. *Plant and Soil*, 2000, 219(1/2): 279–284